第40卷 第3期
2023年3月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 40 No. 3
Mar. 2023

吉兰泰荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆形态示量特征

魏亚娟[1,2]， 党晓宏[1]， 汪 季[1]， 韩彦隆[1]， 解云虎[2]， 蔺 博[1]

（1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院，内蒙古 呼和浩特 010018；
2. 包头师范学院资源与环境学院，内蒙古 包头 014030）

摘 要：白刺（*Nitraria tangutorum*）灌丛沙堆是吉兰泰荒漠绿洲过渡带常见的自然景观。在不同背景植被盖度下，白刺灌丛生长与沙堆形态特征如何变化，仍然未知。通过对白刺灌丛和沙堆形态参数的测量，定量分析不同背景植被盖度下白刺灌丛和沙堆形态参数的差异性，以及白刺灌丛生长特征与白刺灌丛形态之间的关系。探讨背景植被盖度对白刺灌丛沙堆演化的影响。结果表明：（1）4种背景植被盖度下白刺灌丛沙堆演化稳定，白刺灌丛沙堆各形态参数随着背景植被盖度增加逐渐向大规模、小密度方向发展。（2）从整体来看，不同背景植被盖度下白刺灌丛沙堆各形态参数之间存在良好的相关关系。（3）吉兰泰荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆长轴与短轴之间存在二次函数或幂函数关系；除样地1外，白刺沙堆高度和水平尺度之间存在幂函数关系。（4）吉兰泰荒漠绿洲过渡带白刺灌丛盖度主要集中于40%~80%，占灌丛沙堆总量的64.62%，说明研究区白刺灌丛生长状况良好。据此认为研究区白刺灌丛沙堆发育良好，暂时不会成为风沙危害绿洲的策源地。

关键词：白刺灌丛沙堆；背景植被盖度；形态特征；荒漠绿洲过渡带；吉兰泰

荒漠绿洲过渡带介于荒漠与绿洲之间，是荒漠系统和绿洲系统相互转化的生态地带[1]。荒漠绿洲过渡带是以水为主导因子，生态环境极其脆弱，是干旱区的生态敏感带[2]。由于荒漠绿洲过渡带生态系统不稳定，在自然因素和人为因素干扰下，极易演变成沙化土地。因此，加强对荒漠绿洲过渡带研究，有利于保护绿洲生物多样性和稳定性，防止绿洲荒漠化。同时，对维系绿洲生态安全和生态内部稳定起着重要作用[3]。

灌丛沙堆是指在风力作用下，沙粒被丛生灌木阻拦通过影响地表气流结构使沙物质逐渐在其周围堆积而形成的一种常见风积地貌[4]。灌丛沙堆主要发生在干旱、半干旱及亚湿润地区[5]，其演化阶段主要分为雏形阶段、发育阶段、稳定阶段和活化阶段4个阶段[6]。白刺（*Nitraria tangutorum*）灌丛适应性极强，在乌兰布和沙漠广泛存在，是乌兰布和沙漠流动沙丘、半固定沙丘和固定沙丘的建群种，具有减弱风沙流、截留沙粒、防止流沙前移和土地沙化的作用[7]。近年来，白刺灌丛沙堆已经成为众多学者的研究热点，但是主要集中于灌丛沙堆形态与沉积特征[8-9]、空间分布格局[10]和肥岛效应[11]等方面。这些研究只是针对某一特定生境，由于植被的存在可以通过改变地表粗糙度增加风蚀物质堆积，植被类型和配置方式均会对地表粗糙度和风蚀物堆积产生异质性。加强对不同背景植被覆盖条件下，灌丛沙堆形态特征和灌丛生长发育状况的研究非常必要。因此，本研究通过对不同背景植被覆盖条件下，白刺灌丛沙堆形态特征和灌丛生长状况进行比较分析。为进一步了解吉兰泰荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆的形成和演化趋势以及灌丛沙堆保育提供科学依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

研究区位于乌兰布和沙漠西南缘的吉兰泰荒漠-绿洲过渡带（105°39′40″~105°44′56″E，39°45′26″~

收稿日期：2022-05-18； **修订日期：**2022-07-21
基金项目：国家自然科学基金（41967009）；包头师范学院自然科学类一般项目（BSYKJ2021-ZY02）；包头师范学院高层次人才引进科研启动基金项目（BTTCRCQD2020-011）；内蒙古自治区高等学校碳达峰碳中和研究专项（STZX202213）
作者简介：魏亚娟（1994-），女，博士，讲师，研究方向为荒漠化防治. E-mail: 2404336139@qq.com
通讯作者：党晓宏. E-mail: dangxiaohong1986@126.com

39°46′38″N），海拔970 m，属于典型的温带大陆性干旱气候。冬季干冷多风、夏季炎热少雨。年均气温8.6 ℃，年降水量为99.24 mm，降水量年际变化较大、多集中在7—9月（图1），年均风速3.7 m·s⁻¹，主风向为西北风[12-13]。土壤类型主要为风沙土，植被类型包括梭梭（*Haloxylon ammodendron*）、花棒（*Hedysarum scoparium*）、沙拐枣（*Calligonum mongolicum*）和白刺。同时，还有沙蒿（*Artemisia desertorum*）、芨芨草（*Achnatherum splendens*）、芦苇（*Phragmites australis*）和沙米（*Agriophyllum squarrosum*）。

1.2　研究方法

2021年7—8月对研究区白刺灌丛沙堆分布情况进行实地调查，样地由外向内依次为样地1、样地2、样地3和样地4，同时对各样地内白刺灌丛沙堆进行野外调查（表1）。每一个样地沿着主风向设置规格为100 m×100 m的样方，对样方内每一个白刺灌丛沙堆进行测定。用皮尺对灌丛沙堆的长轴（*L*）、短轴（*W*）、沙堆高（*H*）等形态特征进行测定。在测定白刺灌丛沙堆形态参数的同时，对白刺灌丛的株高（*h*）和盖度（*C*）进行测定。白刺灌丛株高和盖度根据灌丛沙堆大小分别在灌丛沙堆迎风坡、背风坡、两个侧坡和坡顶划分1.0 m×1.0 m或0.5 m×0.5 m的样方，测定样方内白刺株高和盖度。每个白刺灌丛沙堆测定5次，然后取平均值为该灌丛沙堆的植被盖度。由于研究区白刺灌丛沙堆外部形态呈半椭圆体，故其底面积（*A*）、沙堆体积（*V*）、水平尺度（*D*）[14]和侧影面积（*S*）[15]用公式表示如下：

$$A=\frac{\pi\times(L+W)}{4} \tag{1}$$

$$V=\frac{\pi\times(L\times W\times H)}{6} \tag{2}$$

$$D=\frac{(L+W)}{2} \tag{3}$$

$$S=\frac{2}{3}W\times(H+h) \tag{4}$$

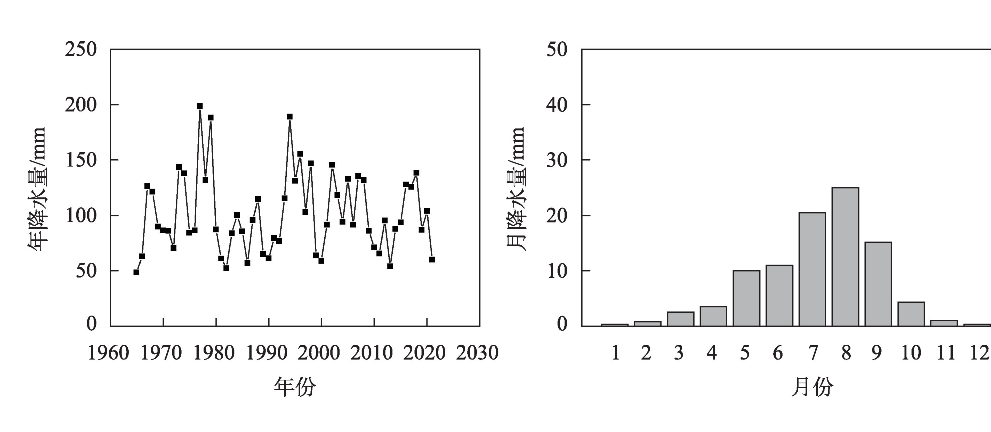


图1　吉兰泰多年降水量和月降水量

Fig. 1　Annual rainfall and monthly rainfall in Jilantai

表1　不同背景植被盖度群落特征

Tab. 1　Community characteristics in different background vegetation coverage

样地	背景植被盖度/%	植被株高/cm	冠幅		自然特征
			长度/cm	宽度/cm	
样地1	3.30	5.34±0.89	–	–	样地处于流动沙丘，沙源丰富，样地内主要分布大量白刺灌丛沙堆，沙堆形态不稳定，样地内伴有少量沙米。
样地2	10.33	295.33±3.06	583.47±273.14	433.78±137.64	样地处于半固定沙地内，沙源丰富，样地内主要分布大量白刺灌丛沙堆，伴有少量的梭梭、沙拐枣。
样地3	25.57	144.00±5.57	–	–	样地处于固定沙地内，沙源较为丰富，样地内主要分布大量白刺灌丛沙堆，还分布大量的芨芨草和芦苇。
样地4	51.49	259.00±13.23	435.67±9.45	424.00±1.73	样地位于防护林内，沙源较为丰富，样地内分布一定量白刺灌丛沙堆，沙堆稳定，样地内同时建植了大量花棒和少量沙拐枣。

注：表中数据为平均值±标准差。

1.3 数据处理

用SPSS 20.0软件进行方差分析(One-way ANOVA 法),并用Origin 2021进行回归分析和绘图。

白刺灌丛沙堆变异系数计算公式:

$$C_v = \frac{SD}{mean} \quad (5)$$

式中:C_v表示变异系数;SD表示标准偏差;mean表示平均值。当$C_v \leq 0.2$属弱变异性,$0.2<C_v<0.5$属中等变异性,$C_v \geq 0.5$属强变异性。

2 结果与分析

2.1 不同背景植被盖度下白刺灌丛沙堆形态特征

白刺灌丛沙堆数量由背景植被增加逐渐减少,且各形态参数大小顺序均为:样地4>样地3>样地2>样地1。此外,长短轴之比随着背景植被盖度呈逐渐降低的变化趋势(表1,表2)。不同背景植被盖度下白刺灌丛沙堆形态参数之间存在一定差异(表2)。4个样地之间灌丛沙堆长轴、短轴、底面积、水平尺度和侧影面积之间差异显著($P<0.05$);样地4白刺灌丛沙堆高、体积与其他3个样地之间差异显著($P>0.05$)。样地4白刺灌丛沙堆高、体积分别是样地1的2.97倍和17.14倍($P>0.05$)。样地2和样地3的白刺灌丛高与样地1和样地4差异显著($P<0.05$)。除白刺灌丛沙堆侧影面积、底面积和体积外,其他白刺灌丛沙堆形态参数变异系数均属于弱变异或中等变异,说明白刺灌丛沙堆演化较为稳定。

由图2可知,吉兰泰荒漠绿洲过渡带80.76%的沙堆高小于1 m,79.23%的沙堆底面积小于10 m^2,67.69%的沙堆体积小于10 m^3。尤其,在样地1和样地2中显得最为突出。

2.2 不同背景植被盖度下白刺灌丛沙堆形态参数之间的关系

不同背景植被盖度下白刺灌丛沙堆长轴和短轴存在较高的相关性(R介于0.67~0.80)。为了进一步探究不同背景植被盖度白刺灌丛沙堆长轴和短轴间的关系,对其进行回归分析。由图3可知,除样地2外,其他样地白刺灌丛沙堆长轴和短轴的回归方程均为幂函数,且幂函数指数小于1,表明白刺灌丛长轴与短轴协同发展,而灌丛沙堆长轴增加的速率大于短轴。在样地2中,白刺灌丛沙堆长轴和短轴的回归方程均表现为二次函数关系,且二项式系数为负值,表明灌丛沙堆短轴随着长轴增加而增加。但是,长轴增加到一定值后,其短轴逐渐降低。

除样地1外,3个样地中白刺灌丛沙堆高与沙堆底面积存在极高的相关性(R介于0.93~1.00)。在样地1中,白刺灌丛沙堆高与沙堆底面积不存在相关关系(R为0.140)。这主要因为样地1处于流动沙垄,该区域风沙环境较为恶劣,加之其背景植被盖度较低。因此,导致该区域白刺灌丛沙堆底面积和沙堆高不能协同发展。回归分析表明,除样地1外,其他3个样地白刺灌丛沙堆H与A的回归方程为线性关系,表明灌丛沙堆高度随底面积增加而增大(图4)。

4个样地白刺灌丛沙堆底面积与体积存在较高的相关性(R介于0.81~0.99)。回归分析表明,白刺灌丛沙堆底面积与体积的回归方程均为幂函数,且幂函数指数大于1,表明在灌丛沙堆生长初期,白刺灌丛沙堆底面积增长速度大于体积增长速度。当

表2 不同样地白刺灌丛沙堆的形态特征

Tab. 2 Different samples of *Nitraria tangutorum* nebkhas shape characteristics

样地	指标	L/m	W/m	$L:W$	D/m	H/m	A/m^2	V/m^3	S/m^2	h/m
样地1 (n=38)	mean±SD	1.64±0.32d	1.05±0.29d	1.56±0.17a	1.46±0.52d	0.58±0.36b	1.46±0.51d	0.67±0.72b	0.65±0.33d	0.26±0.17b
	C_v	0.32	0.29	0.17	0.35	0.36	0.51	0.72	0.66	0.65
样地2 (n=37)	mean±SD	3.31±0.41c	2.56±0.63c	1.36±0.24b	3.62±0.53c	0.60±0.20b	6.80±2.32c	3.02±1.77b	1.90±0.56c	0.41±0.15a
	C_v	0.12	0.25	0.18	0.15	0.33	0.34	0.59	0.30	0.28
样地3 (n=32)	mean±SD	5.32±0.71b	4.15±0.60b	1.29±0.09b	6.17±1.94b	0.82±0.26b	17.78±4.82b	10.71±6.49b	4.32±0.82b	0.44±0.10a
	C_v	0.13	0.15	0.07	0.31	0.32	0.27	0.61	0.67	0.23
样地4 (n=23)	mean±SD	6.56 ±1.45a	4.66 ±1.01a	1.22±1.01b	7.93±2.40a	1.72±0.78a	25.01±9.68a	33.62±23.01a	8.50±2.01a	0.28±0.10b
	C_v	0.22	0.22	0.12	0.30	0.46	0.39	0.68	0.59	0.25

注:同列不同小写字母表示不同背景植被盖度下指标差异显著($P<0.05$);L表示长轴;W表示短轴;$L:W$表示长短轴之比;D表示水平尺度;H表示沙堆高;A表示底面积;V表示沙堆体积;S表示侧影面积;h表示灌丛株高。

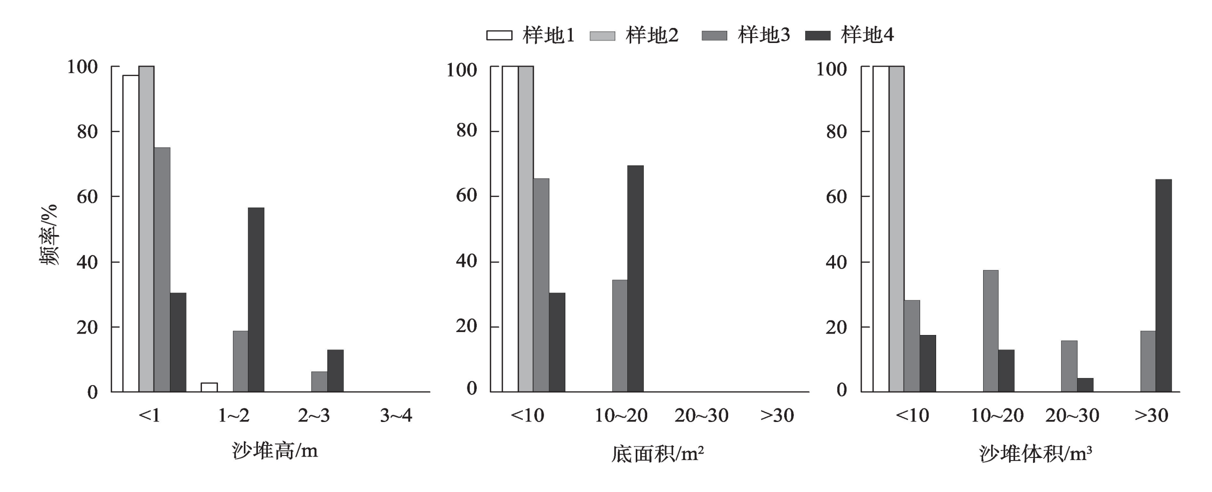


图2 白刺灌丛沙堆形态参数频率分布

Fig. 2 *Nitraria tangutorum* nebkhas shape parameters frequency distribution

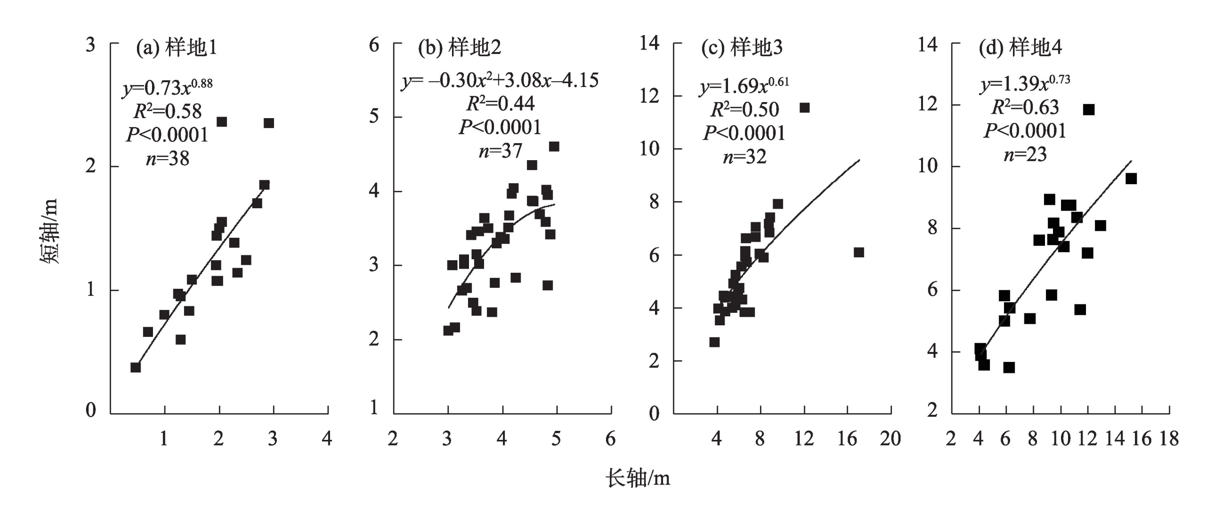


图3 白刺灌丛沙堆长轴与短轴的关系

Fig. 3 The relationship between long axis and short axis of *N. tangutorum* nebkhas

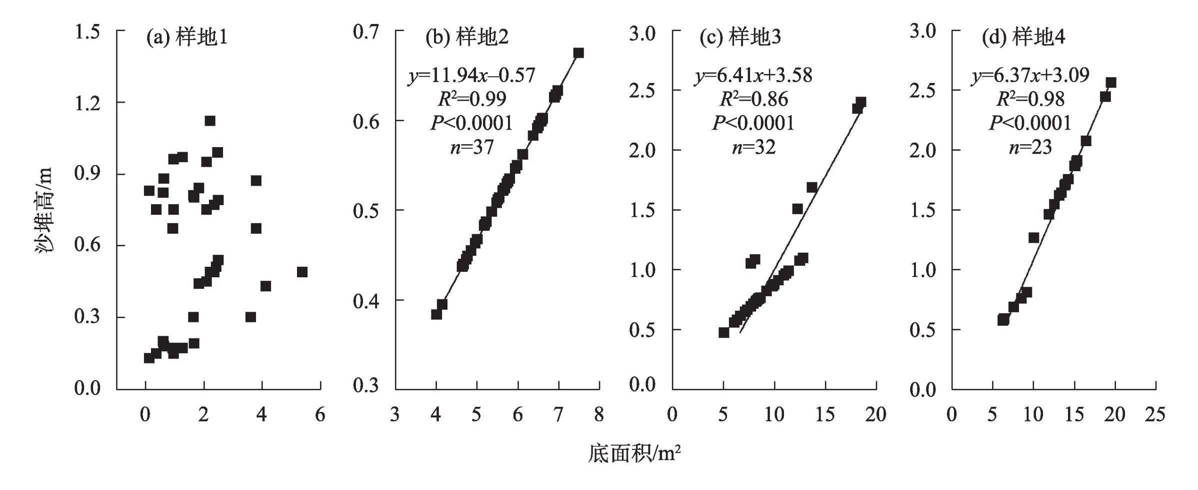


图4 白刺灌丛沙堆底面积与沙堆高的关系

Fig. 4 The relationship between bottom area and height of *N. tangutorum* nebkhas

灌丛底面积达到一定值后,其体积增长速度大于底面积增长速度(图5)。

除了样地1外,其他3个样地白刺灌丛沙堆高和水平尺度存在较高的相关性(R介于0.93~1.00)。回归分析表明,除样地1外,白刺灌丛沙堆高和水平尺度存在极显著的幂函数关系,且幂指数大于1,表明随着白刺灌丛沙堆水平尺度增加,其高度也在增加,并且高度增加速率大于水平尺度的增加速度(图6)。

2.3 不同背景植被盖度白刺灌丛生长特征

灌丛沙堆的形态特征与风力、沙源和植被盖度密切相关。尤其植被盖度,影响着灌丛沙堆的形成与演化。在整个研究区中,白刺盖度在0%~20%、20%~40%、40%~60%、60%~80%和80%~100%的白刺灌丛分别占到11.54%、38.46%、26.15%、19.23%和4.62%(表3)。随着背景植被盖度增加,白刺灌丛盖度呈先增后减的变化趋势。从植被盖度来看,样地3中,白刺灌丛生长状况最好。

3 讨 论

吉兰泰荒漠绿洲过渡带地处乌兰布和沙漠西南缘,分布于吉兰泰荒漠绿洲过渡带的白刺灌丛沙堆不仅可以防止流沙侵入绿洲,还可以保持绿洲稳定性[16]。近年来,由于机电井大量建设,导致该地区地下水位和生态环境承载力持续下降[17]。因此,

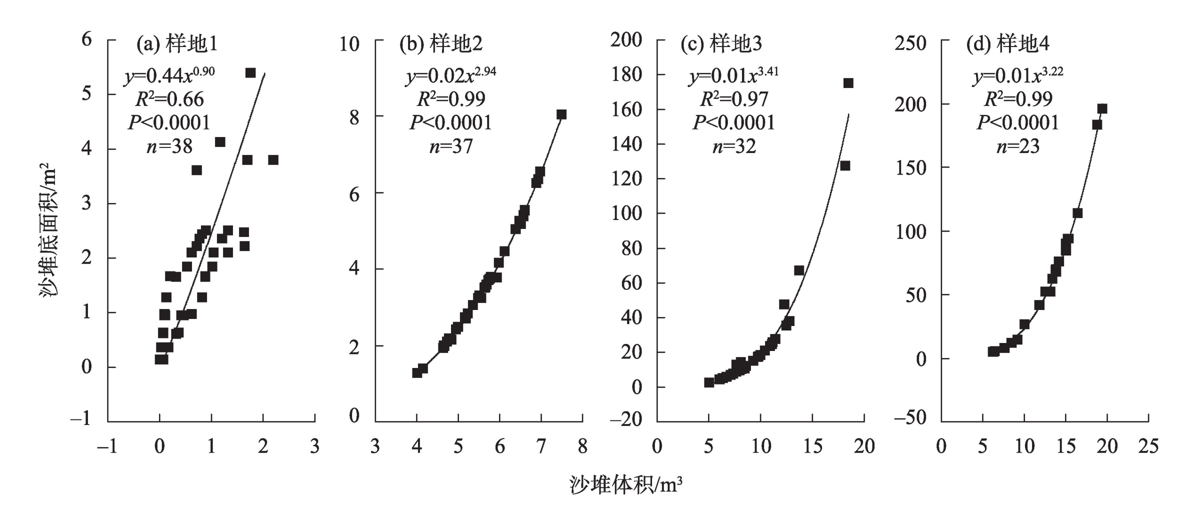


图5　白刺灌丛沙堆底面积与体积之间的关系

Fig. 5　The relationship between area and volume of *N. tangutorum* nebkhas

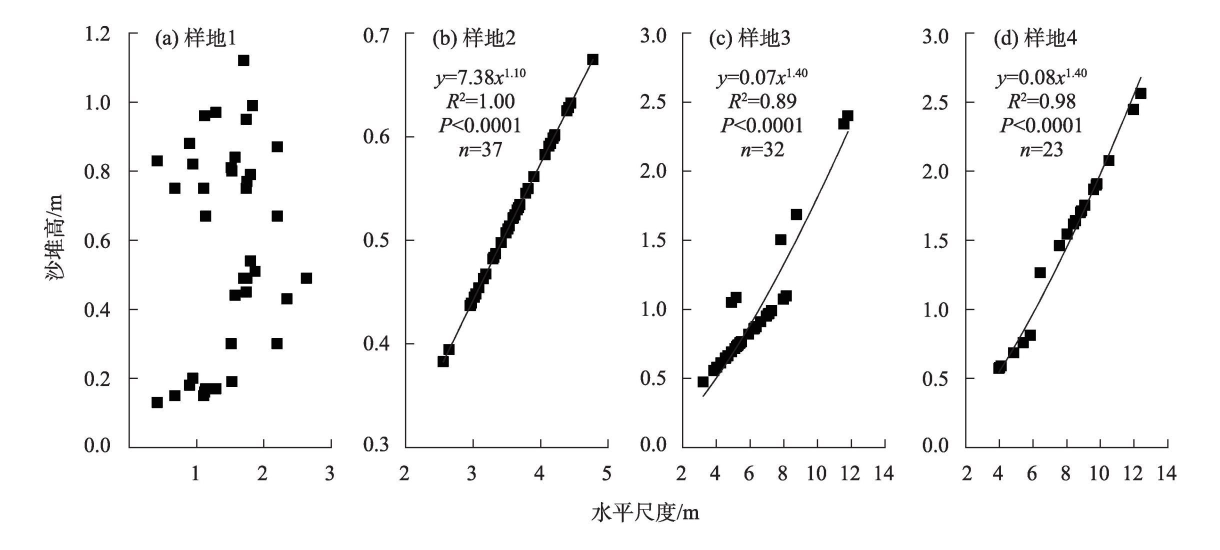


图6　白刺灌丛沙堆高与水平尺度之间的关系

Fig. 6　The relationship between height and horizontal scale of *N. tangutorum* nebkhas

表3 不同背景植被盖度白刺灌丛沙堆的盖度情况

Tab. 3 Coverage situation of *N. tangutorum* nebkhas in different background vegetation coverage

样地	不同白刺灌丛盖度所占比例/%					合计/%	占灌丛沙堆比例/%
	0%~20%	20%~40%	40%~60%	60%~80%	80%~100%		
样地1	13.16	57.89	13.16	15.79	0	850.90	22.39
样地2	5.41	29.73	62.16	2.70	0	1018.33	27.52
样地3	3.13	9.38	12.50	56.25	18.75	1924.15	60.13
样地4	30.43	60.87	8.70	0	0	1070.69	46.55

注:不同白刺灌丛盖度所占比例指各盖度梯度白刺个数占样地内沙堆个数百分比;合计指样地内所有白刺沙堆盖度之和。

现阶段对白刺灌丛沙堆形态特征和植被特征研究具有重要意义。

灌丛沙堆的密集程度不仅反映了吉兰泰荒漠绿洲过渡带的灌丛化程度,还反映了灌丛植物对近地表沙物质的捕捉能力[18]。在本研究中,荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆密度由外向内依次为38个·hm^{-2}、37个·hm^{-2}、32个·hm^{-2}和23个·hm^{-2},该研究结果与彭飞等[19]对白刺灌丛沙堆的研究结果相同。说明白刺灌丛沙堆密度随着背景植被盖度增加逐渐向大规模、小密度方向发展。植被作为大气边界的障碍物,背景植被盖度与携沙气流强度成反比。随着背景植被盖度增加,导致携沙气流强度降低,在灌丛周围汇聚,使灌丛沙堆逐渐合并形成更大的灌丛沙堆。沙源供给量和沙源距离是控制灌丛沙堆规模的主要控制因素[20-21]。本研究中,白刺灌丛沙堆长轴、短轴、沙堆高、侧影面积、底面积和体积随着背景植被盖度增加逐渐增加,研究结果与杨帆等[22]对柽柳灌丛沙堆的研究结果不一致。其研究结果表明荒漠绿洲过渡带柽柳灌丛沙堆尺度由外向内逐渐减小。在本研究中,白刺灌丛沙堆规模与其背景植被盖度具有明显的对应关系。这主要因为吉兰泰荒漠绿洲过渡带背景植被盖度由外向内逐渐增大,显著降低了过境风速,同时增加了吉兰泰荒漠绿洲过渡带临界启动风速,降低了风蚀几率[23-24]。而且,由于吉兰泰荒漠绿洲过渡带风沙环境随着背景植被盖度增加逐渐减弱,导致距离沙源较近的白刺灌丛频繁受到沙埋。新生枝条长度较短,导致其固沙能力由外向内逐渐减弱[25]。

不同背景植被盖度下白刺灌丛沙堆各参数之间存在良好的相关关系,说明在不同背景植被盖度下白刺灌丛沙堆各参数之间协同发展,这是白刺灌丛自我发展保护机制[26]。而且,白刺灌丛沙堆发育尺度越大,形态参数间的关系越明显。这主要因为当白刺灌丛沙堆规模越大,其积沙体和灌丛的共同作用对风沙流的分解能力和捕获能力越强[18]。同时也说明随着背景植被盖度增加,白刺灌丛沙堆演化趋于稳定。另外,白刺灌丛沙堆长轴和短轴呈二次多项式或幂函数关系,该研究结果与马瑞等[27]和杨帆等[22]对白刺灌丛沙堆的研究结果不一致。其研究表明白刺灌丛沙堆长轴与短轴呈一元线性关系。这可能与当地的风沙环境和白刺所处的演化阶段有关。在样地2中,白刺灌丛沙堆短轴随着长轴增加而增加。但是,长轴增加到一定值后,其短轴逐渐降低。这表明至少有一种环境或生物因素影响白刺灌丛沙堆的形态,使沙堆逐渐向稳定状态发展[28]。对于其他样地中,白刺灌丛沙堆长轴增加速率远远大于短轴,表明白刺灌丛沙堆均处于发育阶段。除样地1白刺灌丛沙堆高度和水平尺度、底面积与高度无相关关系;其他样地中白刺灌丛沙堆高度和水平尺度呈幂函数关系,底面积与高度呈线性关系,表明这3个样地白刺灌丛沙堆处于发育阶段[18]。而在样地1中,由于离沙源较近,导致其风沙环境恶劣,风蚀作用大于风积作用。而且,该区域背景植被盖度为5.3%小于16%,影响了灌丛沙堆形态特征[4,29]。而在4种背景植被盖度下,白刺灌丛沙堆底面积和体积呈幂函数关系,再次证明了吉兰泰荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆处于发育阶段。

白刺灌丛沙堆是一种风沙动力平衡地貌,风况、沙源和灌丛特性决定沙堆形态[4]。因此,即使是相同的灌丛植被,其形成的沙堆形态也存在较大差异。研究表明灌丛生长状况越好,其形态参数逐渐增大[4]。在本研究中,植被盖度和枝条高度是影响沙堆形态的决定因素。因为灌丛高度和盖度的增加,同时增大了其侧影面积,从而增加了灌丛对风沙流的拦截面积和沙物质截存量[30]。随着背景植被盖度和白刺盖度增加,白刺灌丛沙堆形态由外向

内逐渐增加。这主要是因为垂直盖度增加了灌丛枝条间的枝系密度,枝条间的通透性降低,进而增强灌丛捕获跃移沙粒的能力以及保护其下的沙物质不被侵蚀[31-32]。加之白刺灌丛株高决定了灌丛沙堆在垂直方向的发育尺度。本研究发现白刺灌丛高度在0.26~0.44 m,其高度范围小于魏亚娟等[25]对吉兰泰白刺灌丛的测量结果。这可能与当地降水量有关,2021年吉兰泰降水量仅有60.30 mm,不利于白刺灌丛生长。在样地1和样地4中,白刺灌丛高度小于其他样地。在样地1中,主要是因为其靠近沙源,且位于主风方向的上风向。由于流动沙丘风沙活动强烈,白刺灌丛经常受到沙打沙割和频繁地沙埋会影响白刺灌丛生长[33]。而样地4远离沙源,在水平方向上灌丛植被对风沙流的多层阻挡作用使得下风向的气流能量降低。风沙流中的沙物质逐渐堆积,白刺灌丛沙堆规模逐渐增大,导致白刺灌丛对土壤水分利用受到限制,其相对高度和盖度也开始降低。本研究还发现,吉兰泰荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆盖度主要集中于40%~80%,占吉兰泰荒漠绿洲过渡带总量的64.62%,而白刺盖度在80%~100%为19.23%。总体来看,吉兰泰荒漠绿洲过渡带白刺灌丛发育状态良好,增加了灌丛沙堆截获沙物质的能力。

4 结 论

吉兰泰荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆密度随着背景植被盖度增加,逐渐向大规模、小密度方向发展,荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆密度由外向内依次为38个·hm^{-2}、37个·hm^{-2}、32个·hm^{-2}和23个·hm^{-2}。随着背景植被盖度和白刺盖度增加,白刺灌丛沙堆形态参数由外向内逐渐增加。从总体来看,吉兰泰荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆各形态参数协同发展,且均处于发育阶段。而且,白刺灌丛发育状态良好,增加了灌丛沙堆截获沙物质的能力。

参考文献(References):

[1] 赵鹏. 民勤绿洲荒漠过渡带植被空间分布及其环境解释[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2014. [Zhao Peng. Spatial Distribution of Plant Communities and Environmental Interpretation in Minqin Oasis-Desert Ecotone[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2014.]

[2] 马瑞, 王继和, 屈建军, 等. 民勤绿洲-荒漠过渡带植被梯度特征及其土壤水环境[J]. 生态学杂志, 2010, 29(6): 1075-1080. [Ma Rui, Wang Jihe, Qu Jianjun, et al. Vegetation gradient characteristics and soil water environment of oasis-desert transitional zone in Minqin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(6): 1075-1080.]

[3] 贾宝全, 慈龙骏. 新疆生态用水量的初步估算[J]. 生态学报, 2000, 20(2): 243-250. [Jia Baoquan, Ci Longjun. The primary estimation of water demand by the eco-environment in Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(2): 243-250.]

[4] Tengberg A. Nebkha dunes as indicators of wind erosion and land degradation in the Sahel zone of Burina Faso[J]. Journal of Arid Environments, 1995, 30(3): 265-282.

[5] 阿丝叶·阿不都力米提, 玉苏甫·买买提. 焉耆盆地不同生境白刺灌丛沙堆形态特征分析[J]. 中国农学通报, 2016, 32(32): 117-123. [Asiye Ablimit, Yusup Mamat. Morphological characteristics of *Nitraria* nebkhas in Yanqi Basin under different habitats [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(32): 117-123.]

[6] 杜建会, 严平, 丁连刚, 等. 民勤绿洲不同演化阶段白刺灌丛沙堆表面土壤理化性质研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(2): 248-253. [Du Jianhui, Yan Ping, Ding Liangang, et al. Soil physical and chemical properties of *Nitraria tangutorun* nebkhas surface at different development stages in Minqin Oasis[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(2): 248-253.]

[7] 赵倩云, 王辉, 黄朝珺. 不同发育阶段白刺群落的结构特征及分布格局[J]. 防护林科技, 2012, 30(6): 4-6. [Zhao Qianyun, Wang Hui, Huang Zhaojun. Structural characteristics & distribution pattern of *Nitraria tangutorum* community in the different development stages[J]. Protection Forest Science and Technology, 2012, 30(6): 4-6.]

[8] 李向洁, 李志文, 杜建会, 等. 南昌市厚田沙地蔓荆灌丛沙堆的形态与沉积特征[J]. 地理科学, 2021, 41(11): 2042-2051. [Li Xiangjie, Li Zhiwen, Du Jianhui, et al. Morphology and sedimentary characteristics of *Vitex trifolia* nebkhas in the Houtian Sandy Land of Nanchang City[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41 (11): 2042-2051.]

[9] 黄钦妮, 董治宝, 肖南, 等. 海南岛景心角海滩老鼠艻(*Spinifex littoreus*)灌丛沙堆沉积及形态特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(6): 157-168. [Huang Qinni, Dong Zhibao, Xiao Nan, et al. Sediments and morphology of coastal *Spinifex littoreus* nebkhas on Jingxinjiao beach of Hainan Island, China[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(6): 157-168.]

[10] 刘冰, 赵文智, 杨荣. 荒漠绿洲过渡带柽柳灌丛沙堆特征及其空间异质性[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1446-1455. [Liu Bing, Zhao Wenzhi, Yang Rong. Characteristics and spatial heterogeneity of *Tamarix ramosissima* nebkhas at desert-oasis ecotone[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1446-1455.]

[11] 罗维成, 赵文智, 任珩, 等. 不同气候区灌丛沙堆形态及土壤养分积累特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(2): 191-199. [Luo Weicheng, Zhao Wenzhi, Ren Yan, et al. Nebkha morphological characteristics and soil nutrition content in three regions with dif-

ferent climates in North China[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(2): 191-199.]

[12] 许丽, 姚云峰, 张汝民, 等. 吉兰泰地区梭梭与肉苁蓉生境土壤生态系统主导因子的关联分析[J]. 内蒙古林学院学报, 1999, 21(1): 28-32. [Xu Li, Yao Yunfeng, Zhang Rumin, et al. Grey relational gradation of the leading factors in soil ecosystem for *Haloxylon Ammodendron* and *Cistanche deserticola* habitat in Jilantai region[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry College, 1999, 21(1): 28-32.]

[13] 韩永伟, 王堃, 张汝民, 等. 吉兰泰地区退化梭梭蒸腾生态生理学特性[J]. 草地学报, 2002, 10(1): 40-44. [Han Yongwei, Wang Kun, Zhang Rumin, et al. Study on the transpiration eco-physiological characteristics of degenerated *Haloxylon ammodendron* in Jilantai[J]. Acta Agrestia Sinica, 2002, 10(1): 40-44.]

[14] Khalaf F I, Misak R, Aldousari A. Sedimentological and morphological characteristics of some nabkha deposits in the northern coastal plain of Kuwait, Arabia[J]. Journal of Arid Environments, 1995, 29(3): 267-292.

[15] 张萍, 哈斯, 岳兴玲, 等. 白刺灌丛沙堆形态与沉积特征[J]. 干旱区地理, 2008, 31(6): 130-136. [Zhang Ping, Ha Si, Yue Xingling, et al. *Nitaria* nebkhas: Morphology and sediments[J]. Arid Land Geography, 2008, 31(6): 130-136.]

[16] Nickling W G, Wolfe S A. The morphology and origin of nabkhas, region of Mopti, Mali, west Africa[J]. Journal of Arid Environments, 1994, 28(1): 13-30.

[17] 宋国慧. 沙漠湖盆区地下水生态系统及植被生态演替机制研究[D]. 西安: 长安大学, 2012. [Song Guohui. Study on Groundwater Dependent Ecosystem and Ecological Mechanisms of Vegetation Succession in Desert Lake-Basin Region[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.]

[18] 哈斯, 杜会石, 孙禹. 内蒙古高原小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)灌丛沙丘: 形态特征及表面气流[J]. 第四纪研究, 2013, 33(2): 314-324. [Ha Si, Du Huishi, Sun Yu. *Caragana microphylla* nabkhas in Inner Mongolia Plateau: Morphology and surface airflow[J]. Quaternary Sciences, 2013, 33(2): 314-324.]

[19] 彭飞, 王涛, 刘立超, 等. 民勤荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆演化阶段及其空间格局[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 593-599. [Peng Fei, Wang Tao, Liu Lichao, et al. Evolution phases and spatial pattern of nebkhas in Minqin desert-oasis ectone[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(3): 593-599.]

[20] Leenders J K, Boxel J H V, Sterk G. The effect of single vegetation elements on wind speed and sediment transport in the Sahelian zone of Burkina Faso[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2010, 32(10): 1454-1474.

[21] Tengberg A, Chen D. A comparative analysis of nebkhas in central Tunisia and northern Burkina Faso[J]. Geomorphology, 1998, 22(2): 181-192.

[22] 杨帆, 王雪芹, 何清, 等. 绿洲-沙漠过渡带柽柳灌丛沙堆形态特征及空间分布格局[J]. 干旱区研究, 2014, 31(3): 556-563. [Yang Fan, Wang Xueqin, He Qing, et al. Morphological features and spatial distribution pattern of *Tamarix ramosissima* nebkhas in an oasis-desert ecotone[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(3): 556-563.]

[23] 谭凤翥, 王雪芹, 王海峰, 等. 柽柳灌丛沙堆及丘间地蚀积分布随背景植被变化的风洞实验[J]. 干旱区地理, 2018, 41(1): 56-65. [Tan Fengzhu, Wang Xueqin, Wang Haifeng, et al. Wind tunnel simulation on distribution change of erosion and deposition around nebkhas and interdune under different background vegetation coverage[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(1): 56-65.]

[24] 张春来, 邹学勇, 董光荣, 等. 植被对土壤风蚀影响的风洞实验研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 31-33. [Zhang Chunlai, Zou Xueyong, Dong Guangrong, et al. Wind tunnel studies on influences of vegetation on soil wind erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(3): 31-33.]

[25] 魏亚娟, 汪季, 党晓宏, 等. 不同生境白刺(*Nitraria tangutorum*)灌丛沙堆形态特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 253-261. [Wei Yajuan, Wang Ji, Dang Xiaohong, et al. Morphological features of *Nitraria tangutorum* nebkhas in different habitats[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 253-261.]

[26] 张进虎, 唐进年, 李得禄, 等. 民勤荒漠绿洲过渡带灌丛沙堆形态特征及分布格局[J]. 中国沙漠, 2015, 35(5): 1141-1149. [Zhang Jinhu, Tang Jinnian, Li Delu, et al. Morphological characteristics and distribution patterns of nebkhas in desert-oasis ecotone[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(5): 1141-1149.]

[27] 马瑞, 赵锦梅, 马彦军, 等. 巴丹吉林沙漠南缘近流沙区白刺灌丛沙堆形态特征与空间分布[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 217-221, 236. [Ma Rui, Zhao Jinmei, Ma Yanjun, et al. Morphological characteristics and spatial distrubution of *Nitraria tangutorum* nebkhas near shifting sand of southern margin of Badain Jaran Desert[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 217-221, 236.]

[28] 支莹, 刘树林, 康文平, 等. 浑善达克沙地锦鸡儿属(*Caragana*)灌丛沙堆形态特征研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1438-1448. [Zhi Ying, Liu Shulin, Kang Wenping, et al. Morphological characteristics of *Caragana* shrub-coppice dune in Otindag Sandy Land[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1438-1448.]

[29] 杨帆, 王雪芹, 杨东亮, 等. 不同沙源供给条件下柽柳灌丛与沙堆形态的互馈关系——以策勒绿洲沙漠过渡带为例[J]. 生态学报, 2012, 32(9): 2707-2719. [Yang Fan, Wang Xueqin, Yang Dongliang, et al. Research on the morphological interactions between *Tamarix ramosissima* thickets and nebkhas under different sand supply conditions: A case study in Cele oasis-desert ecotone[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(9): 2707-2719.]

[30] Hesp P. Foredunes and blowouts: Initiation, geomorphologyand dynamics[J]. Geomorphology, 2002, 48: 245-268.

[31] 李志忠, 武胜利, 肖晨曦, 等. 新疆和田河流域灌丛沙堆风洞流场的实验研究(Ⅱ)[J]. 中国沙漠, 2007, 27(1): 15-19. [Li Zhizhong, Wu Shengli, Xiao Chenxi, et al. Study on wind-tunnel simu-

lated flow pattern over nabkha dunes in Hetian River Basin, Xinjiang(Ⅱ)[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(1): 15−19.]

[32] 余沛东, 陈银萍, 李玉强, 等. 植被盖度对沙丘风沙流结构及风蚀量的影响[J]. 中国沙漠, 2019, 39(5): 29−36. [Yu Peidong, Chen Yinping, Li Yuqiang, et al. Influence of vegetation coverage on sand flow structure and wind erosion yield with wind tunnel experiment as a case[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(5): 29−36.]

[33] 安晶, 哈斯, 杜会石, 等. 内蒙古高原小叶锦鸡儿灌丛沙堆对气流结构与风蚀的影响[J]. 干旱区研究, 2015, 32(2): 304−312. [An Jing, Ha Si, Du Huishi, et al. Impact of *Caragana microphylla* nabkhas on airflow structure and wind erosion in Inner Mongolia plateau[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(2): 304−312.]

Morphological characteristics of *Nitraria tangutorum* nebkhas in Jilantai desert-oasis ecotone

WEI Yajuan[1,2], DANG Xiaohong[1], WANG Ji[1], HAN Yanlong[1], XIE Yunhu[2], LIN Bo[1]

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 2. Department of Resource and Environment, Baotou Teachers' College, Baotou 014030, Inner Mongolia, China)

Abstract: *Nitraria tangutorum* nebkha is a common natural landscape in the desert-oasis ecotone of Jilantai; however, the growth characteristics of *N. tangutorum* shrubs and the morphological characteristics of *N. tangutorum* nebkhas under different background vegetation coverages remain unknown. Through the measurement of shrubs and morphological characteristics of *N. tangutorum* nebkhas, the variability of morphological parameters of *N. tangutorum* nebkhas and the relationship between the growth characteristics and morphology of *N. tangutorum* nebkhas were quantitatively analyzed under different background vegetation coverages. The influence of background vegetation coverage on the succession of *N. tangutorum* nebkhas was also discussed. Results showed that: (1) the evolution of *N. tangutorum* nebkhas was stable under four different background vegetation coverages. The morphological parameters of *N. tangutorum* nebkhas gradually developed toward large scale and small density with the increasing background vegetation coverage. (2) Overall, a good correlation was found between the morphological parameters of *N. tangutorum* nebkhas under different background vegetation coverages. (3) In the desert-oasis ecotone of Jilantai, the relationship between the L and W of *N. tangutorum* nebkhas followed a quadratic or power function, and the relationship between the A and V of *N. tangutorum* nebkhas followed a power function. Except for sample site 1, the relationship between A and H and between H and D followed linear trend and power function, respectively. (4) The coverage of *N. tangutorum* nebkhas was mainly 40%−80%, accounting for 64.62% of total *N. tangutorum* nebkhas in the desert-oasis ecotone of Jilantai. This finding indicated that the *N. tangutorum* nebkhas in the study area is well grown, widely developed, and temporarily not a source of wind and sand damage to the oasis.

Keywords: *Nitraria tangutorum* nebkha; background vegetation coverage; morphological characteristics; desert-oasis ecotone; Jilantai